第46卷 第2期
2023年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 2
Feb. 2023

甘肃省行业碳排放影响因素及脱钩努力研究

吴 茜， 陈强强
（甘肃农业大学财经学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：利用LMDI模型解构了2010—2019年甘肃省13个细分行业碳排放影响因素及其作用效应，运用Tapio脱钩模型分析了经济增长与碳排放的脱钩关系，在此基础上，检验了各因素对脱钩做出的努力程度。结果表明：（1）2010—2019年甘肃省细分行业碳排放总量增加3843.13×10⁴ t，主要集中在石油制造业、化工制造业、钢铁制造业以及电力行业等高能耗行业；能源消费结构的高碳化特征显著，能源消费强度呈下降趋势。改善高能耗产业能源消费结构、推动高能耗产业转型升级是未来甘肃省碳减排的重点。（2）经济增长和人口规模对碳排放产生增量效应，而能源强度、能源结构对碳排放产生减排效应，产业结构对部分行业产生减排效应。（3）各行业碳排放与经济增长的脱钩情况趋于向好，除电力行业仍为弱脱钩外，其他行业均由2010—2016年的负脱钩或弱脱钩转变为2016—2019年的强脱钩或衰退脱钩。（4）能源强度效应的脱钩努力最高，能源结构和产业结构效应的脱钩努力尽管较小但逐渐增强，人口规模效应的脱钩努力不明显。

关 键 词：碳排放；LMDI指数分解模型；脱钩；细分行业；甘肃省
文章编号：1000－6060(2023)02－0274－10(0274～0283)

气候变暖问题以其对生态环境破坏的严峻性与对人类生存发展威胁亟需解决的紧迫性受到广泛关注，全球共同应对气候变暖问题已然成为人类命运共同体的应有之义。据国际能源署（IEA）统计，2019年，中国以98.09×10⁸ t的碳排放量居于全球首位。面对这一严峻的碳排放现状，中国向国际社会做出了2030年实现碳达峰，2060年实现碳中和的郑重承诺，并在“十四五”规划中将“双碳”目标纳入生态文明建设整体布局。甘肃省不仅是我国能源资源的主要供应基地[1]，亦是我国重要的生态安全屏障区。近年来，“一带一路”倡议的提出对当地产业经济的运行能效提出了更高要求，然而以“能源、资源密集型”为主要特征的产业发展路径导致以“高消耗、高投入、低产出”为特征的经济运行模式，由此带来的能源消耗和碳排放增加问题亟需解决。针对甘肃省细分行业碳排放进行影响因素分解与脱钩分析对于碳减排目标的规划落实和产业绿色低碳转型发展具有重要的实践意义。

不同行业的碳排放特征具有显著差异性，研究行业碳排放问题对于精准识别区域碳减排的具体着力点至关重要。研究表明，行业碳排放通常由人口、经济、技术进步、产业结构等多种因素共同决定。以对数平均迪氏指数（LMDI）分解法[2]为代表的分解分析法和以STIRPAT模型为代表的回归分析法成为碳排放影响因素研究的两大主流。其中，LMDI分解法以其能够包容零值数据且分解后无残差的特点受到学者的青睐，并广泛应用于农业[3]、工业[4]、交通运输业[5]等行业碳排放的影响因素研究。王霞等[6]对我国制造业碳排放的影响因素进行研究得出，经济增长对碳排放产生显著的增量效应，能源强度则因区域的不同呈现双向效应。赖文亭等[7]对福建省重点行业的碳排放影响因素进行了分解，得出发展低碳技术、调整产业和能源结构是该地区实现降碳环保的重要着力点。

大量研究表明[8-10]，经济增长是碳排放增加的主要促因，如何更好的兼顾经济与环保、发展与减

收稿日期：2022-03-30； **修订日期：**2022-05-09
基金项目：国家社会科学基金项目（21BJY117）资助
作者简介：吴茜（1998-），女，在读硕士，主要从事区域经济等方面的研究. E-mail: wx834754007@163.com
通讯作者：陈强强（1979-），男，教授，主要从事区域经济等方面的研究. E-mail: jjglxy666@126.com

排是当前我国实现"双碳"目标的重大议题。对于两者关系的研究大多基于环境库兹涅茨曲线(EKC)[11]和脱钩[12]2个视角展开，分别对应二者的长期相关关系和短期效应表现。分行业来看，李明煜等[13]对我国省域的电力、钢铁及水泥行业进行了脱钩分析；王君华等[14]对工业细分行业经济增长与碳排放的脱钩状态进行了研究；刘博文等[15]测算了我国各区域的行业碳排放脱钩指数，在此基础上构建脱钩努力模型，探讨了脱钩的内在动因。

综上所述，现有文献极大地丰富了行业碳减排领域的研究，但对于欠发达地区省域层面的细分行业碳排放问题鲜有涉及。本研究以2010—2019年甘肃省13个细分行业为研究对象，利用LMDI模型对行业碳排放的影响因素进行分解。进而运用Tapio脱钩模型分析经济增长与碳排放之间的脱钩关系，并进一步分析各影响因素对脱钩做出的努力，以期为甘肃省行业碳减排策略的制定与实施提供参考。

1　数据与方法

1.1　数据来源与处理

能源消费量、年末常住人口、GDP、分行业GDP均来自于《甘肃发展年鉴(2011—2020)》。由于工业细分行业的GDP无法获取，借鉴贺勇等[16]的方法，用(行业产值/工业总产值)×工业总GDP来计算。为了消除价格因素的影响，将历年GDP转换为2010年不变价。

1.2　研究方法

1.2.1　IPCC法　使用IPCC法测算甘肃省细分行业碳排放量，公式如下：

$$C=\frac{44}{12}\times\sum_{i=1}^{13}\sum_{j=1}^{9}k_j\times m_j\times E_{ij} \tag{1}$$

式中：C为碳排放量；i为13个细分行业；j为原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气9种化石燃料；k_j、m_j分别为j化石燃料的碳排放及折标煤系数；E_{ij}为i行业j化石燃料能源消费量；44和12分别为CO_2和C的相对分子(原子)质量。

1.2.2　LMDI模型　借鉴Ang等[2]提出的LMDI模型对细分行业碳排放影响因素进行分解，公式如下：

$$C=\sum_{i=1}^{13}\sum_{j=1}^{9}C_{ij}=\sum_{i=1}^{13}\sum_{j=1}^{9}\frac{C_{ij}}{E_{ij}}\times\frac{E_{ij}}{E_i}\times\frac{E_i}{G_i}\times\frac{G_i}{G}\times\frac{G}{P}\times P=\sum_{i=1}^{13}\sum_{j=1}^{9}\mathrm{CI}\times\mathrm{ES}\times\mathrm{EI}\times\mathrm{SI}\times\mathrm{GP}\times P \tag{2}$$

$$\Delta C=C^t-C^0=\Delta C_{\mathrm{CI}}+\Delta C_{\mathrm{ES}}+\Delta C_{\mathrm{EI}}+\Delta C_{\mathrm{SI}}+\Delta C_{\mathrm{GP}}+\Delta C_P \tag{3}$$

式中：C_{ij}为i行业j化石燃料产生的碳排放量；E_{ij}为i行业j化石燃料能源消费量；E_i为i行业能源消费总量；G_i为i行业的GDP；G为总GDP；P为年末人口数；CI、ES、EI、SI、GP、P分别为碳排放系数、能源结构、能源强度、产业结构、经济增长和人口规模；ΔC为总效应；C^t、C^0分别为目标年、基期年碳排放量；ΔC_{CI}、ΔC_{ES}、ΔC_{EI}、ΔC_{SI}、ΔC_{GP}、ΔC_P分别为各影响因素对碳排放量产生的效应。

具体的各影响因素效应计算公式如下：

$$\Delta C_x=\sum_{i=1}^{13}\sum_{j=1}^{9}L\left(C_{ij}^t,C_{ij}^0\right)\ln\left(\frac{x^t}{x^0}\right) \tag{4}$$

式中：x为上述各影响因素；ΔC_x为影响因素x的碳排放效应；$L\left(C_{ij}^t,C_{ij}^0\right)$为权重；$C_{ij}^t$、$C_{ij}^0$分别为目标年和基期年$i$行业$j$化石燃料产生的碳排放量；$x^t$和$x^0$分别为目标和基期年的影响因素值。其中，权重公式如下：

$$L\left(C_{ij}^t,C_{ij}^0\right)=\begin{cases}\dfrac{C_{ij}^t-C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t-\ln C_{ij}^0}, & C_{ij}^t\neq C_{ij}^0\\ C_{ij}^t\text{或}C_{ij}^0, & C_{ij}^t=C_{ij}^0\\ 0, & C_{ij}^t=C_{ij}^0=0\end{cases} \tag{5}$$

为了便于比较，借鉴赖文亭等[7]的研究方法，使用相对贡献度来描述各效应对碳排放量的影响程度，公式如下：

$$\delta=\frac{\Delta C_x}{\sum_x\left|\Delta C_x\right|}\times 100\% \tag{6}$$

式中：δ为相对贡献度。$\delta>0$，该影响因素对碳排放产生促进效应，且值越大，促进效应越强；$\delta<0$，该影响因素对碳排放产生抑制效应，且绝对值越大，抑制效应越强。

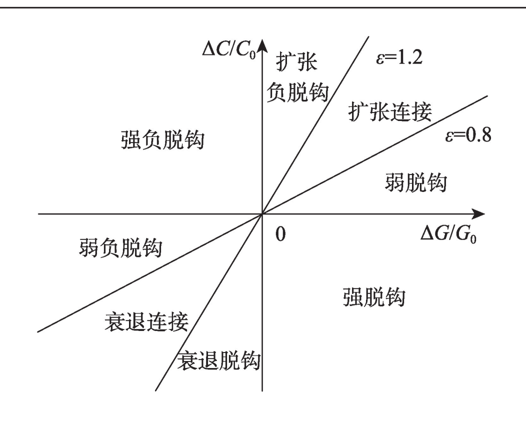
1.2.3　脱钩分析

(1) Tapio脱钩模型

使用Tapio脱钩模型[12]来研究经济增长与碳排放之间的脱钩关系，公式如下：

$$\varepsilon=\frac{\Delta C/C_0}{\Delta G/G_0} \tag{7}$$

式中：ε为脱钩指数；ΔC、ΔG分别为碳排放及GDP变化量；C_0为基期年碳排放量；G_0为基期年GDP。脱钩状态具体定义见图1。



注：$\Delta C/C_0$为碳排放增长率；$\Delta G/G_0$为GDP增长率；ε为脱钩指数。

图1 脱钩状态图

Fig. 1 Diagram of decoupling state

（2）脱钩努力模型

为进一步分析各因素对经济增长与碳排放脱钩做出的努力，构建如下模型：

$$D=\frac{\Delta C-\Delta C_{\mathrm{GP}}}{\Delta C_{\mathrm{GP}}}=\frac{\Delta C'}{\Delta C_{\mathrm{GP}}}=-\frac{\Delta C_{\mathrm{ES}}}{\Delta C_{\mathrm{GP}}}-\frac{\Delta C_{\mathrm{EI}}}{\Delta C_{\mathrm{GP}}}-\frac{\Delta C_{\mathrm{SI}}}{\Delta C_{\mathrm{GP}}}-\frac{\Delta C_{P}}{\Delta C_{\mathrm{GP}}}=D_{\mathrm{ES}}+D_{\mathrm{EI}}+D_{\mathrm{SI}}+D_{P} \tag{8}$$

式中：D和$\Delta C'$分别为剔除经济增长效应后的脱钩努力指标和碳排放变化量；D_{ES}、D_{EI}、D_{SI}、D_P分别为各影响因素的脱钩努力。当$D\geq1$时，表示强脱钩努力；$0<D<1$时，表示弱脱钩努力；$D\leq0$时，表示无脱钩努力。

2 结果与分析

2.1 甘肃省能源消费状况分析

从甘肃省行业能源消费总体情况来看（图2），2019年能源消费总量为7919.59×10^4 t；煤炭、石油消费量分别占到了化石能源消费总量的64.89%和34.67%，表明煤炭仍是能源消费的主要形式，能源消费格局的高碳化特征显著，能源消费结构优化空间较大。分行业来看，电力行业、钢铁制造业、化工制造业能源消费量占比分别为34.82%、15.13%、7.56%，是煤炭消费的主要行业；石油制造业和运输业能源消费占比分别为29.98%、4.93%，是石油消费的主要行业。

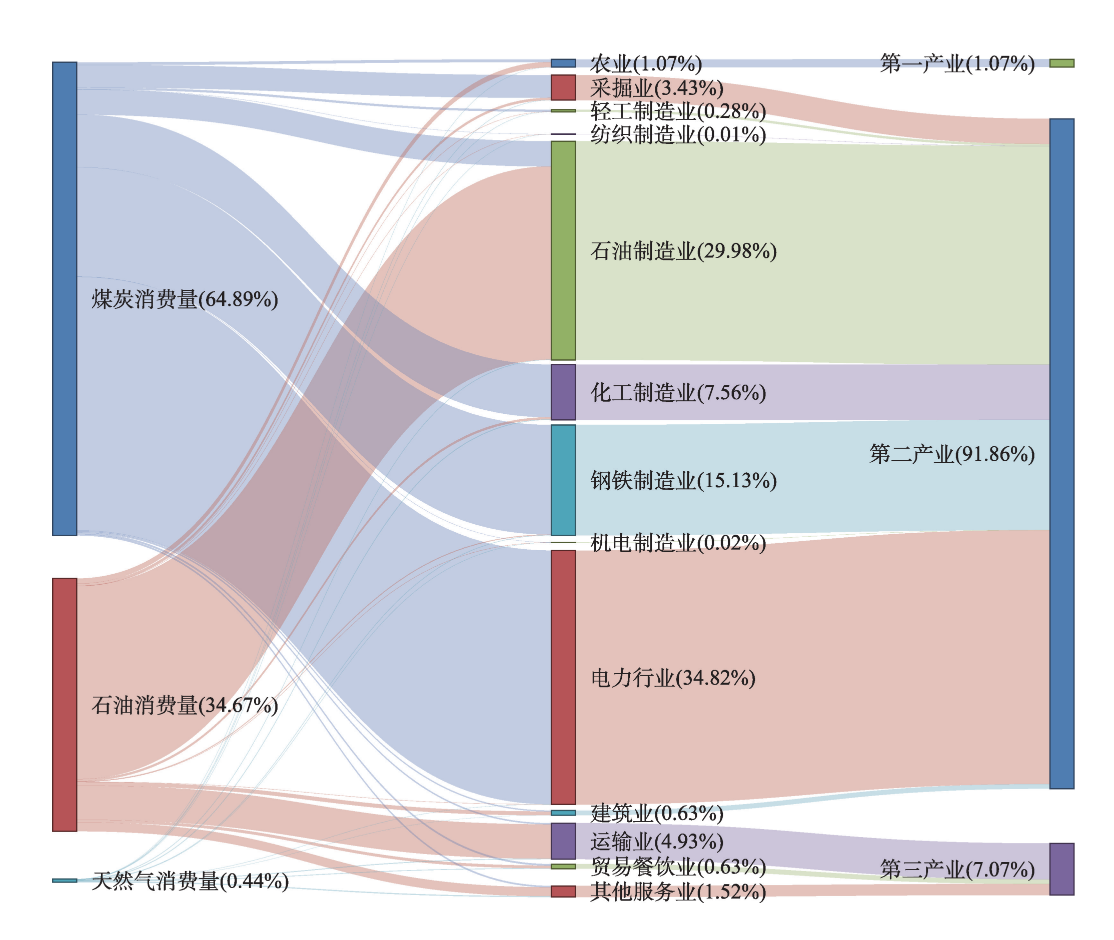


图2 2019年甘肃省细分行业分品种能源消费情况

Fig. 2 Different types of energy consumption of industries in Gansu Province in 2019

以能源消费强度均值等于1为界，将13个细分行业分为高能耗和低能耗两类行业进行分析（图3a~b）。从整体来看，2010—2019年甘肃省细分行业的能源消费强度均呈下降趋势，表明节能技术水平得到了较为显著的提升，产业发展模式逐渐由高能耗粗放式向低能耗精细化转变。分行业来看，以电力行业和石油制造业为代表的高耗能行业能源消费强度呈出显著下降趋势，但与其他行业相比仍处于较高的位置；机电制造业、贸易餐饮业、其他服务业的能源消费强度多年来一直处于较低水平，均值分别为0.07 t·(10^4元)$^{-1}$、0.11 t·(10^4元)$^{-1}$、0.05 t·(10^4元)$^{-1}$，能源利用效率较高。

2.2 甘肃省碳排放现状分析

2010—2019年甘肃省细分行业碳排放量由16520.90×10^4 t上升至20364.03×10^4 t，增加了3843.13×10^4 t（图4）。其中，电力行业的贡献量最大，占细分行业碳排放总增量的53.85%，采掘业、石油制造业、化工制造业、钢铁制造业、运输业、贸易餐饮业及其他服务业7个行业的碳排放量同样表现为正增长；而农业、轻工制造业、纺织制造业、机电制造业及建筑业5个行业的碳排放量均不同程度的下降，降幅介于20.49×10^4~119.28×10^4 t之间。

结合甘肃省细分行业碳排放量（表1）可以看出，甘肃省碳排放主要集中在石油制造业、化工制

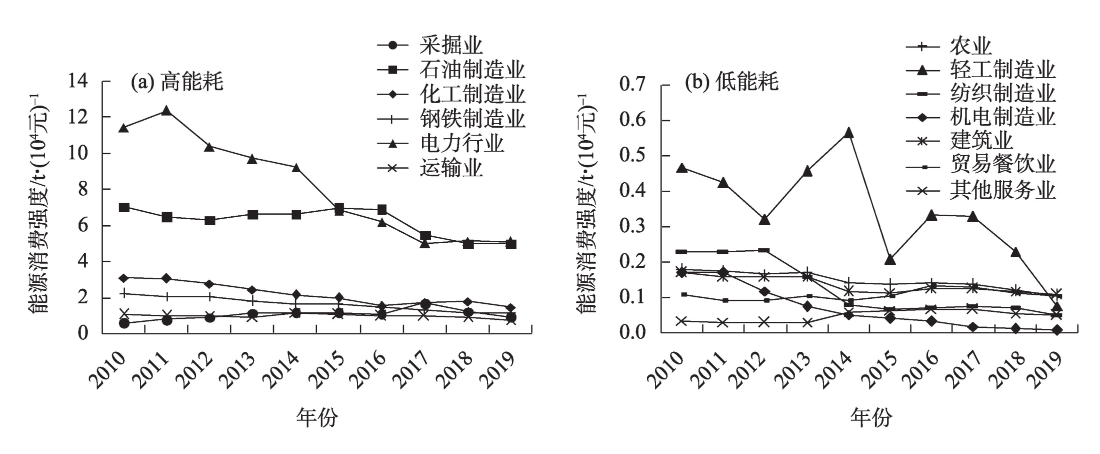
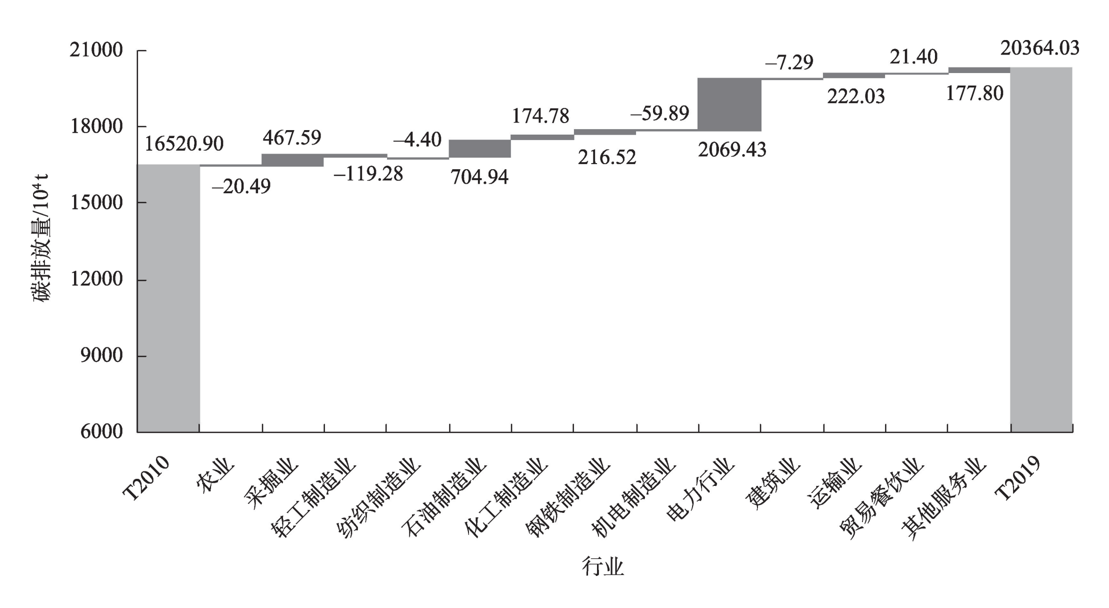


图3　2010—2019年细分行业能源消费强度

Fig. 3　Energy consumption intensity of industries from 2010 to 2019



注：T2010、T2019分别为2010、2019年的细分行业碳排放总量。

图4　2010—2019年甘肃省细分行业碳排放增长趋势

Fig. 4　Growth trend of carbon emissions of industries in Gansu Province from 2010 to 2019

表1 甘肃省细分行业碳排放量

Tab. 1 Carbon emissions of industries in Gansu Province

/Mt

行业	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
农业	2.20	2.28	2.33	2.50	2.14	2.17	2.42	2.44	2.22	1.99
采掘业	2.74	5.17	7.01	9.36	10.39	10.33	11.02	11.66	9.54	7.41
轻工制造业	1.80	1.74	1.84	3.04	4.31	1.89	3.64	2.63	1.62	0.61
纺织制造业	0.05	0.07	0.09	0.08	0.05	0.04	0.04	0.02	0.02	0.01
石油制造业	45.64	52.21	49.54	52.78	49.43	48.91	46.24	49.22	50.96	52.69
化工制造业	14.88	15.71	19.04	20.03	20.00	20.36	18.84	18.05	17.34	16.63
钢铁制造业	32.50	36.47	38.12	38.66	39.28	43.01	37.74	38.64	36.65	34.67
机电制造业	0.62	0.64	0.48	0.35	0.24	0.19	0.18	0.07	0.05	0.03
电力行业	55.73	68.83	68.69	69.75	67.16	58.74	56.19	55.44	65.93	76.42
建筑业	1.20	1.20	1.31	1.45	1.10	1.14	1.28	1.25	1.19	1.13
运输业	6.17	6.57	7.39	7.78	10.17	9.42	9.13	9.24	8.82	8.39
贸易餐饮业	0.90	0.83	0.84	0.96	0.79	0.92	1.18	1.17	1.14	1.11
其他服务业	0.78	0.80	0.82	0.99	2.03	2.44	2.81	2.79	2.68	2.56

造业、钢铁制造业、电力行业等高能耗行业，且均呈现出上升趋势。可见，改善高能耗产业能源消费结构，推动高能耗产业转型升级是当前甘肃省碳减排的重中之重。

2.3 甘肃省碳排放影响因素分解分析

各影响因素对细分行业碳排放的相对贡献度如表2所示。考虑到2013年提出的“一带一路”倡议构想及“十三五”规划对甘肃省碳排放量变化的影响，将研究期分为2010—2013年、2013—2016年、2016—2019年3个时间段进行分析。

2.3.1 人口规模效应(ΔC_P) 人口规模效应在3个时段对碳排放量的增加表现为促进作用，除轻工制造业、纺织制造业和机电制造业外，其他10个行业的人口规模效应均呈增长趋势。其中，运输业、建筑业和农业的人口规模效应相对贡献度均处于较高的水平，均值分别为2.7%、2.4%和2.3%，表明人口规模扩大所带来的交通压力、住所需求、土地利用变化以及粮食安全等问题对于碳排放量增长的影响日益显现。

2.3.2 经济增长效应(ΔC_{GP}) 经济增长效应在3个时段对碳排放量的增加表现出显著的促进作用，但是随着时间的变化，各个行业经济增长效应均呈下降趋势。2010—2013年石油制造业、建筑业和运输业的经济增长效应十分显著，相对贡献度分别为60.3%、67.9%和74.8%；2013—2016年经济增长效应最显著的行业为采掘业，相对贡献度为70.0%；2016—2019年经济增长效应的促进作用明显减弱，各个行业的相对贡献度均降低到40%以下。尽管甘肃省经济增长对于细分行业碳排放增加的促进作用明显下降，但经济增长效应仍为碳排放量增加的最主要诱因，如何在兼顾经济增长的同时实现碳减排这一难题仍亟需解决。

2.3.3 产业结构效应(ΔC_{SI}) 产业结构效应在3个时段始终表现为碳排放促进作用的行业有电力行业和其他服务业；而机电制造业和建筑业表现为抑制作用，且抑制作用逐渐增强。产业结构效应对其他行业的影响方向波动较大，2010—2013年产业结构效应表现为抑制作用的行业数为6个；2013—2016年采掘业、纺织制造业和钢铁制造业的产业结构效应由促进转为抑制，表现出抑制作用的行业数增加为9个，并且剩余行业产业结构促进作用相比2010—2013年略有下降，表明2013年提出的“一带一路”倡议提升了甘肃省产业升级水平，产业结构优化成果显著；2016—2019年表现为抑制作用的行业数下降为6个，且石油制造业、电力行业等高能耗产业的产业结构效应仍旧多表现为促进作用，高能耗产业的绿色低碳化发展仍旧是未来要努力的方向。

2.3.4 能源强度效应(ΔC_{EI}) 能源强度在3个时段对碳排放均表现出显著的减量效应，且有增强的趋势，表明甘肃省细分行业能源利用效率逐渐提高，行业生产过程中对于节能技术创新的重视程度日益增长并得到了积极反馈。其中，能源强度效应相对贡献度较大的行业为机电制造业、钢铁

表2　甘肃省细分行业碳排放影响因素相对贡献度

Tab. 2　Relative contribution of influencing factors of industry carbon emissions in Gansu Province

年份	效应	农业	采掘业	轻工制造业	纺织制造业	石油制造业	化工制造业	钢铁制造业	机电制造业	电力行业	建筑业	运输业	贸易餐饮业	其他服务业
2010—2013	ΔC_P	1.6*	0.7*	1.5*	0.8*	1.6*	1.1*	1.5*	0.7*	1.6*	1.8*	2.0*	1.4*	1.6*
	ΔC_{GP}	59.5***	25.9**	57.4***	30.3**	60.3***	41.3**	57.3**	26.3**	58.3***	67.9***	74.8***	53.8***	59.4***
	ΔC_{SI}	−28.5**	16.1*	37.5**	34.6**	−24.9*	26.6**	5.9*	−3.7*	10.4*	−15.6*	−0.3*	−34.9**	10.9*
	ΔC_{EI}	−9.8*	52.6***	−3.3*	−34.1**	−11.6*	−30.5**	−34.7**	−67.7***	−29.8**	−14.7*	−21.2*	−5.5*	−25.9**
	ΔC_{ES}	0.6*	4.8*	0.3*	0.2*	1.6*	−0.5*	0.6*	−1.6*	0.0*	(0.0)*	−1.7*	−4.3*	−2.3*
	ΔC	0.30	6.62	1.24	0.02	7.14	5.15	6.15	−0.27	14.02	0.25	1.61	0.06	0.21
2013—2016	ΔC_P	2.3*	3.6*	1.3*	1.0*	1.6*	1.2*	2.3*	1.0*	1.6*	1.9*	2.7*	1.4*	0.9*
	ΔC_{GP}	44.6**	70.0***	25.7**	19.1*	31.6**	23.8*	45.1**	18.7*	30.9**	37.3**	54.0***	27.8**	17.9*
	ΔC_{SI}	−12.8*	−4.6*	33.5**	−3.0*	−60.0***	20.7*	−0.4*	−5.4*	1.5*	−7.8*	−26.2**	−28.7**	9.3*
	ΔC_{EI}	−36.2**	−18.1*	−38.9**	−73.5***	6.3*	−53.5***	−49.1**	−74.8***	−65.9***	−44.2**	13.9*	34.6**	68.3***
	ΔC_{ES}	−4.2*	3.8*	0.7*	−3.4*	0.5*	0.8*	−3.1*	−0.2*	0.0*	−8.7*	−3.2*	−7.5*	−3.5*
	ΔC	−0.07	1.66	0.61	−0.04	−6.54	−1.19	−0.91	−0.17	−13.56	−0.16	1.35	0.22	1.83
2016—2019	ΔC_P	2.9*	2.0*	0.7*	0.8*	1.8*	3.4*	3.5*	0.4*	2.0*	3.4*	3.3*	2.6*	2.6*
	ΔC_{GP}	26.4**	19.0*	6.3*	7.6*	16.9*	31.5**	32.3**	3.7*	19.0*	31.2**	30.4**	24.1*	24.1*
	ΔC_{SI}	1.0*	−57.1***	−21.6*	−62.0***	38.5**	−52.0***	2.1*	−6.4*	51.1***	−31.7**	6.5*	18.2*	14.5*
	ΔC_{EI}	−66.1***	−21.4*	−70.2***	−19.3*	−41.6**	−9.8*	−60.4***	−42.5**	−27.9**	−32.0**	−56.0***	−48.9**	−54.3***
	ΔC_{ES}	−3.6*	0.5*	−1.2*	−10.2*	1.2*	−3.3*	1.7*	−47.0**	0.0*	−1.8*	−3.8*	−6.2*	−4.4*
	ΔC	−0.43	−3.61	−3.03	−0.03	6.45	−2.21	−3.08	−0.15	20.23	−0.16	−0.74	−0.06	−0.26

注：ΔC_P、ΔC_{GP}、ΔC_{SI}、ΔC_{EI}、ΔC_{ES}分别为人口规模、经济增长、产业结构、能源强度和能源结构对碳排放量产生的效应；ΔC为总效应（Mt）；表中数据（0.0）数值为−0.005；*、**、***表示促进（或抑制）作用的大小。

制造业、纺织制造业和电力行业，相对贡献度均值分别为−61.7%、−48.1%、−42.3%和−41.2%。

2.3.5　能源结构效应（ΔC_{ES}）　从表2可以明显看出，随着时间的变化，能源结构对碳排放表现为抑制作用的行业数逐渐增加，并且逐渐增强。2010—2013年能源结构表现为抑制作用的行业有6个；2013—2016年农业、纺织制造业和钢铁制造业由促进作用转为抑制作用，表现为抑制作用的行业共有8个；2016—2019年表现为抑制作用的行业共有9个，仅采掘业、电力行业、石油制造业和钢铁制造业表现为促进作用。《甘肃省"十四五"能源发展规划》指出，"十三五"期间，甘肃省以河西地区的新能源开发优势为依托，不断深化能源体制改革，非化石能源供给能力得到了较为显著的提升。

2.4　甘肃省碳排放与经济增长脱钩分析

经济增长是甘肃省细分行业碳排放增加的最主要因素，进一步深入分析两者的脱钩程度及变化趋势对于解决如何更好兼顾地区经济增长与碳减排任务这一难题具有重要意义。

从甘肃省细分行业碳排放脱钩情况来看（表3），2010—2013年除采掘业为扩张负脱钩、轻工制造业为扩张连接外，其他行业均表现为弱脱钩。2013—2016年运输业、贸易餐饮业和其他服务业均表现为扩张负脱钩，表明甘肃省的第三产业迅速发展的同时，对能源消费的依赖程度增加；农业、化工制造业、钢铁制造业、建筑业等行业的脱钩程度均有提升，由弱脱钩转为强脱钩。2016—2019年大多行业处于强脱钩状态，采掘业、轻工制造业、化工制造业等行业甚至处于衰退脱钩状态，即碳排放量降低的速度高于经济衰退的速度，表明该时段内甘肃省的产业结构转换较为明显，部分行业出现经济衰退现象，碳排放量随之下降。

2.5　甘肃省碳排放影响因素脱钩努力分析

从甘肃省细分行业各影响因素脱钩努力情况来看（表4），在整个研究期内，13个行业人口规模效应的脱钩努力值均小于0，未做出努力。

在3个时段内产业结构效应对不同行业做出了差异化的脱钩努力。2010—2013年农业、贸易餐饮业、建筑业、运输业、石油制造业及机电制造业6个行业的产业结构效应做出弱脱钩努力；2013—2016

年采掘业、纺织制造业和钢铁制造业的脱钩努力值由负转正,石油制造业、贸易餐饮业的产业结构效应由弱脱钩努力提高为强脱钩努力;2016—2019年产业结构做出脱钩努力的行业数减少,表明甘肃省产业结构调整仍有较大空间。

能源强度效应方面,在研究期内能源强度效应对大部分行业均作出了脱钩努力,且随着时间变化,表现出的脱钩努力越来越强,2016—2019年除化工制造业为弱脱钩努力外,其他行业均为强脱钩努力。

能源结构效应方面,随着时间的变化,能源结构效应的脱钩努力有显著增强的趋势,在2016—2019年能源结构效应对大部分行业的碳排放脱钩均做出了脱钩努力,表明甘肃省产业能源结构调整的相关政策效果明显。

3 讨 论

关于甘肃省碳排放影响因素的分解研究大多集中于宏观层面。刘定惠等[1]、董莹等[17]对甘肃省碳排放变化的影响因素进行了分解,研究结果表明,经济增长对碳排放的增量效应显著,能源强度则是降低碳排放的关键要素。本研究从甘肃省细分行业层面分析了碳排放的影响因素得出,经济增长和人口规模表现为增量效应,且经济增长效应是主要促因;能源强度和能源结构表现为减量效应,且能源强度的减排作用更为显著;产业结构效应对不同行业影响方向不同,化工制造业、建筑业等行业的产业结构效应的抑制作用经历了较为显著的改善过程,而钢铁制造业、电力行业等的产业结构效应则表现为促进作用。本研究结论与上述学者研究结果相一致。从影响因素选择上看,董莹等[17]在分析了上述因素对碳排放的影响的基础上,将森林碳汇、城镇化率加入评估体系中进行了考量,得出城镇化率促进了碳排放的增加,而森林碳汇的固碳作用较强。

本研究表明,能源强度效应不仅降碳作用明显,而且对于碳排放和经济增长的脱钩也做出了显著的脱钩努力,这与赖文亭等[7]对福建省碳排放影响因素及其脱钩努力的研究结果相一致。因此,降低能源消费强度、提高能源利用效率是有效提升碳排放与经济增长之间脱钩水平的重要着力点。政府和企业应积极引进低碳生产技术和高效节能设备,同时加大科研研发力度,鼓励创新,注重节能环保技术的开发与优化,进一步发挥科技创新的支撑作用。

在我国的“双碳”目标下,政府更好的履行宏观调控职能,为碳减排创造有利的政策环境至关重要。政府应综合考虑当地产业结构特点、细分行业碳排放水平及减排潜力等,精准识别各行业碳减排的具体着力点,对高能耗行业和低能耗行业制定差异化的行业碳排放配额方案。同时建立健全碳排

表3 甘肃省细分行业碳排放脱钩情况

Tab. 3 Decoupling situation of industry carbon emissions in Gansu Province

行业	2010—2013年		2013—2016年		2016—2019年	
	ε	脱钩状态	ε	脱钩状态	ε	脱钩状态
农业	0.70	弱脱钩	-0.17	强脱钩	-1.09	强脱钩
采掘业	3.43	扩张负脱钩	0.77	弱脱钩	1.48	衰退脱钩
轻工制造业	0.95	扩张连接	0.31	弱脱钩	3.15	衰退脱钩
纺织制造业	0.40	弱脱钩	-2.32	强脱钩	1.24	衰退脱钩
石油制造业	0.71	弱脱钩	0.76	弱负脱钩	0.25	弱脱钩
化工制造业	0.48	弱脱钩	-0.12	强脱钩	1.71	衰退脱钩
钢铁制造业	0.43	弱脱钩	-0.10	强脱钩	-0.49	强脱钩
机电制造业	-1.31	强脱钩	-2.88	强脱钩	10.52	衰退脱钩
电力行业	0.53	弱脱钩	-0.75	强脱钩	0.55	弱脱钩
建筑业	0.70	弱脱钩	-0.59	强脱钩	-9.98	强脱钩
运输业	0.66	弱脱钩	1.37	扩张负脱钩	-0.42	强脱钩
贸易餐饮业	0.50	弱脱钩	59.43	扩张负脱钩	-0.19	强脱钩
其他服务业	0.56	弱脱钩	4.72	扩张负脱钩	-0.36	强脱钩

注:ε为脱钩指数。

表4　甘肃省细分行业碳排放影响因素脱钩努力情况

Tab. 4　Decoupling effort of influencing factors of industry carbon emissions in Gansu Province

效应	2010—2013年				2013—2016年				2016—2019年			
	D_P	D_{SI}	D_{EI}	D_{ES}	D_P	D_{SI}	D_{EI}	D_{ES}	D_P	D_{SI}	D_{EI}	D_{ES}
农业	−0.03	0.48*	0.16*	−0.01	−0.05	0.29*	0.81*	0.09*	−0.11	−0.04	2.50**	0.13*
采掘业	−0.03	−0.62	−2.03	−0.18	−0.05	0.07*	0.26*	−0.05	−0.11	3.01*	1.13**	−0.03
轻工制造业	−0.03	−0.65	0.06*	−0.01	−0.05	−1.31	1.51**	−0.03	−0.11	3.44*	11.15**	0.19*
纺织制造业	−0.03	−1.14	1.12**	−0.01	−0.05	0.16*	3.84**	0.18*	−0.11	8.17*	2.54**	1.35**
石油制造业	−0.03	0.41*	0.19*	−0.03	−0.05	1.90**	−0.20	−0.02	−0.11	−2.28	2.47**	−0.07
化工制造业	−0.03	−0.64	0.74*	0.01*	−0.05	−0.87	2.25**	−0.03	−0.11	1.65*	0.31*	0.10
钢铁制造业	−0.03	−0.10	0.60*	−0.01	−0.05	0.01*	1.09**	0.07*	−0.11	−0.06	1.87**	−0.05
机电制造业	−0.03	0.14*	2.58**	0.06*	−0.05	0.29*	3.99**	0.01*	−0.11	1.75*	11.58**	12.81**
电力行业	−0.03	−0.18	0.51*	0.00	−0.05	−0.05	2.13**	0.00	−0.11	−2.69	1.47**	0.00
建筑业	−0.03	0.23*	0.22*	0.00*	−0.05	0.21*	1.19**	0.23*	−0.11	1.02*	1.03**	0.06*
运输业	−0.03	0.00*	0.28*	0.02*	−0.05	0.49*	−0.26	0.06*	−0.11	−0.21	1.84**	0.12*
贸易餐饮业	−0.03	0.65*	0.10*	0.08*	−0.05	1.03*	−1.25	0.27*	−0.11	−0.75	2.03**	0.26*
其他服务业	−0.03	−0.18	0.44*	0.04*	−0.05	−0.52	−3.82	0.20*	−0.11	−0.60	2.25**	0.18*

注：D_P、D_{SI}、D_{EI}和D_{ES}分别为人口规模、产业结构、能源强度和能源结构效应的脱钩努力；*、**分别表示弱脱钩努力和强脱钩努力。

放交易权和碳税融合机制[18]，进一步完善甘肃省碳减排政策体系。

王勇等[19]从国家层面对工业细分行业的碳达峰时间与峰值大小进行了预测并对其减排潜力进行了评估；董棒棒等[20]以西北五省为研究对象，对碳达峰进行了预测，并分析了环境规制等因素对峰值的影响。本研究仅对甘肃省的行业碳排放影响因素及其脱钩效应进行了探讨，细分行业的碳达峰形势与减排潜力还有待进一步评估研究。

4　结　论

（1）2010—2019年甘肃省细分行业碳排放量增加3843.13×10^4 t，石油制造业、化工制造业、钢铁制造业以及电力行业等高耗能行业成为碳排放的主要来源。甘肃省煤炭消费量占比高达64.89%，能源消费结构高碳化特征显著，但各细分行业的能源消费强度均呈下降趋势。

（2）经济增长和人口规模对碳排放表现为增量效应，而能源强度、能源结构的减排效应显著，产业结构对部分行业产生减排效应。

（3）各行业碳排放与经济增长的脱钩情况趋于向好，且能源强度效应的脱钩努力最高，能源结构和产业结构效应的脱钩努力尽管较低但不断增强，而人口规模效应的脱钩努力不明显。

参考文献（References）

[1] 刘定惠, 杨永春. 甘肃省碳排放变化的因素分解及实证分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(3): 510−516. [Liu Dinghui, Yang Yongchun. Factor decomposition and demonstration analysis of carbon emission variation in Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(3): 510−516.]

[2] Ang B W, Zhang F Q, Choi K H. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition[J]. Energy, 1998, 23(6): 489−495.

[3] 史俊晖, 戴小文. 我国省域农业隐含碳排放及其驱动因素时空动态分析[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(8): 169−180. [Shi Junhui, Dai Xiaowen. Spatial dynamics of agricultural embodied carbon emissions in provinces of China and the related driving factors[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(8): 169−180.]

[4] 王强, 伍世代, 林羽珊. 中国东南沿海地区工业能源消费碳排放的驱动因素分析[J]. 资源科学, 2015, 37(6): 1239−1248. [Wang Qiang, Wu Shidai, Lin Yushan. Driving factors of industrial energy consumption and carbon emissions in southeast coastal regions of China: Taking Fujian Province as a case study[J]. Resources Science, 2015, 37(6): 1239−1248.]

[5] 张国兴, 苏钊贤. 黄河流域交通运输碳排放的影响因素分解与情景预测[J]. 管理评论, 2020, 32(12): 283−294. [Zhang Guoxing, Su Zhaoxian. Analysis of influencing factors and scenario prediction of transportation carbon emissions in the Yellow Rive Basin[J]. Management Review, 2020, 32(12): 283−294.]

[6] 王霞, 张丽君, 秦耀辰, 等. 中国制造业碳排放时空演变及驱动

因素研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 536-545. [Wang Xia, Zhang Lijun, Qin Yaochen, et al. Spatial-temporal evolution on the manufacturing industry's carbon emission and its driving factor in China[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 536-545.]

[7] 赖文亭, 王远, 黄琳琳, 等. 福建省行业碳排放驱动因素分解及其与经济增长脱钩关系[J]. 应用生态学报, 2020, 31(10): 3529-3538. [Lai Wenting, Wang Yuan, Huang Linlin, et al. Decomposition of driving factors of industry-related CO_2 emissions and its decoupling with economic growth in Fujian Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(10): 3529-3538.]

[8] Shan Y, Huang Q, Guan D, et al. China CO_2 emission accounts 2016—2017[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 1-9.

[9] Wang Q, Li R, Jiang R. Decoupling and decomposition analysis of carbon emissions from industry: A case study from China[J]. Sustainability, 2016, 8(10): 1059-1076.

[10] Engo J. Decomposing the decoupling of CO_2 emissions from economic growth in Cameroon[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2018, 25(35): 35451-35463.

[11] 黄丽, 王武林, 龚姣. 中亚五国自华进口贸易技术溢出及碳排放影响研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 986-997. [Huang Li, Wang Wulin, Gong Jiao. Research on important of technology spillover from China and the impact of carbon emissions in the five Central Asian counties[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 986-997.]

[12] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. Transport Policy, 2005, 12(2): 137-151.

[13] 李明煜, 张诗卉, 王灿, 等. 重点工业行业碳排放现状与减排定位分析[J]. 中国环境管理, 2021, 13(3): 28-39. [Li Mingyu, Zhang Shihui, Wang Can, et al. The carbon emission status and emission reduction positioning of key industrial sectors[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(3): 28-39.]

[14] 王君华, 李霞. 中国工业行业经济增长与CO_2排放的脱钩效应[J]. 经济地理, 2015, 35(5): 105-110. [Wang Junhua, Li Xia. The effect of sector decoupling between China's industrial economic growth and carbon dioxide emissions[J]. Economic Geography, 2015, 35(5): 105-110.]

[15] 刘博文, 张贤, 杨琳. 基于LMDI的区域产业碳排放脱钩努力研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(4): 78-86. [Liu Bowen, Zhang Xian, Yang Lin. Decoupling efforts of regional industrial development on CO_2 emissions in China based on LMDI analysis[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(4): 78-86.]

[16] 贺勇, 傅飞飞, 廖诺. 基于STIRPAT模型的工业研发投入对碳排放影响效应分析[J]. 科技管理研究, 2021, 41(17): 206-212. [He Yong, Fu Feifei, Liao Nuo. Analysis on the effect of R&D investment on carbon emission in industrial sector based on STIRPAT model[J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(17): 206-212.]

[17] 董莹, 许宝荣, 华中, 等. 基于LMDI的甘肃省碳排放影响因素分解研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(5): 606-614. [Dong Ying, Xu Baorong, Hua Zhong, et al. Factor decomposition of carbon emission in Gansu Province based on LMDI[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition), 2020, 56(5): 606-614.]

[18] 陈向阳. 碳排放权交易和碳税的作用机制、比较与制度选择[J]. 福建论坛(人文社会科学版), 2022(1): 75-86. [Chen Xiangyang. Mechanism of carbon emission trading and carbon tax, comparison and system selection[J]. Fujian Tribune, 2022(1): 75-86.]

[19] 王勇, 毕莹, 王恩东. 中国工业碳排放达峰的情景预测与减排潜力评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(10): 131-140. [Wang Yong, Bi Ying, Wang Endong. Scene prediction of carbon emission peak and emission reduction potential estimation in Chinese industry[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(10): 131-140.]

[20] 董棒棒, 李莉, 唐洪松, 等. 环境规制、FDI与能源消费碳排放峰值预测——以西北五省为例[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 689-697. [Dong Bangbang, Li Li, Tang Hongsong, et al. Environmental regulation, FDI and energy consumption peak carbon emissions forecast: A case of five provinces in northwest China[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 689-697.]

Influencing factors and decoupling efforts of industry-related carbon emissions in Gansu Province

WU Xi, CHEN Qiangqiang

(College of Economics and Management of Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Accurate identification of specific focus points of industry carbon reduction is crucial to realize China's goal of "carbon peak by 2030 and carbon neutral by 2060". This study used the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) method to decompose the influencing factors and their effects on the carbon emission of 13 subsectors (from 2010 to 2019) in Gansu Province. The Tapio decoupling model was used to analyze the relationship between carbon emission and economic growth. Accordingly, a decoupling effort model of influencing factors, excluding economic factors, was constructed to analyze the efforts made by other factors to decoupling. The following results are obtained. (1) From 2010 to 2019, carbon emissions for subsectors in Gansu Province increased by 3843.13×10^4 t, mainly in petroleum, chemical, steel, and power industries. Specifically, the energy consumption structure of Gansu Province was characterized by high carbon emissions. Coal consumption made up 64.89% of the entire fossil energy consumption in 2019. Energy consumption intensity emerged a decreasing trend, whereas energy efficiency kept improving. (2) Economic growth and population scale exhibited an incremental effect caused by the economic growth effect. Energy intensity and structure demonstrated a reduction effect, and the reduction effect of energy intensity was more significant. However, the influence direction of the industrial structure effect fluctuated greatly in different time periods and industries. The industrial structure effect on chemical and construction industries had a relatively significant reduction, whereas that on steel and power industries was increased carbon emissions. (3) The decoupling effect of carbon emissions from the economic growth of 13 subsectors improved. From 2010 to 2013, all industries exhibited a weak decoupling effect, except for mining and light manufacturing that showed negative decoupling and expansion connection. From 2013 to 2016, some industries, such as agriculture, chemical, and steel manufacturing, underwent a strong decoupling effect. From 2016 to 2019, all sectors changed to strong or recessionary decoupling, except for the power sector, which remained weak. (4) The energy intensity effect played the most important role in decoupling. Particularly, the decoupling effect of energy and industrial structures was small but gradually increasing, whereas that of the population scale was not evident. Evidently, reducing energy consumption intensity and improving energy use efficiency are crucial points to accelerate the process of carbon emission reduction and effectively enhance the decoupling level in Gansu Province. On the basis of this finding, the following should be proposed. First, governments and enterprises should actively introduce low-carbon production technologies and high-efficiency energy-saving equipment, encourage innovation, and focus on the development and optimization of energy-saving and environmental protection technologies. Second, governments should comprehensively consider the characteristics of local industrial structures, carbon emission levels, and emission reduction potentials of subsectors and then formulate differentiated quota schemes for industrial carbon emissions for high- and low-energy industries.

Key words: carbon emission; LMDI model; decoupling; industry segmentation; Gansu Province